

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ ОБМОТКИ РОТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

С.В. Прохоров

Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: sergei_prohorov@inbox.ru

Научный руководитель: Глазырин А.С., канд. технич. наук, доцент

В данной работе, на основании исследований Самородова Ю.Н., был проанализирован один из наиболее распространенных дефектов турбогенераторов - витковое замыкание в обмотке ротора. Условно стадии развития дефекта были разделены на три части: Первый уровень. Отклонения от нормальной работы, устраняемые без снятия бандажных колец. Второй уровень. Отклонения от нормальной работы, устраняемые которых необходимо снять бандажные кольца и восстановить изоляцию. Третий уровень. Нарушение магнитного натяжения привело к усталостности металла и появлению микротрещин в шейке вала. Ротор подлежит замене.

На основании данного разделения были рассчитаны приблизительные стоимость ремонта и время простоя в период исправления неисправностей и пуска и останова машины

В современном индустриальном мире одной из основ развития любой страны является промышленность. Само понятие промышленности является достаточно широким и подразделяется на множество отраслей: легкую промышленность, пищевую, химическую, тяжелое машиностроение и так далее. Но вне зависимости от специализации любое промышленное производство немыслимо без электрической энергии. Данное обстоятельство выводит на первый план энергетику, которая несмотря на бурное развитие и огромные перспективы все еще не нашла эффективного решения для некоторых фундаментальных проблем. Одной из таких проблем является невозможность накопления большого объема электрической энергии и ее дальнейшее использование в «пиковых» режимах. Так в частности при низком электропотреблении в энергосистеме (в ночное время суток) электростанции вынуждены снижать выработку электричества, а при «пиковых» нагрузках (дневное время суток) соответственно увеличивать. То есть образуется «жесткая» связь между производством и потреблением электроэнергии. Все это предъявляет к системам электроснабжения высокие требования по надежности. Надежность и бесперебойность электроснабжения зависят от работы всей технологической цепочки электрооборудования участвующей в производстве, преобразовании и доставки до потребителя электрической энергии.

Одним из основных звеньев этой цепи является электрическая машина – синхронный генератор. Синхронный генератор представляет собой сложную электро-механическую систему и его безаварийная работа зависит от состояния основных элементов конструкции: обмотки статора, обмотки ротора, активной стали, системы охлаждения генератора, подшипниковых узлов и так далее. Каждый из перечисленных элементов имеет определенный набор характерных для него дефектов, проявляющихся в зависимости от условий его работы и способных вызвать аварийный останов генератора. Исходя из опыта эксплуатации крупных электрических машин [Самородов Ю.Н. «Дефекты генераторов»] наиболее распространенным видом дефекта вращающихся электрических машин являются дефекты, связанные с обмоткой статора, системами ее охлаждения и крепления. Тем не менее, обмотка ротора

также является объектом повышенных нагрузок во время работы машины, что приводит к образованию дефектов способных вызвать аварийную остановку.

Одним из наиболее распространенных дефектов является витковые замыкания в обмотки ротора. Целью данной работы является технико-экономическое обоснование построения системы диагностики витковых замыканий обмотки ротора синхронного генератора. Перед началом работы необходимо провести краткий анализ основных нагрузок приходящих на обмотку ротора, причин развития витковых замыканий и ввести основные термины и определения которыми необходимо будет оперировать в данном проекте.

Во время работы крупных электрических машин обмотка ротора подвергается воздействию следующих факторов:

- **огромные динамические нагрузки** возникающие вследствие вращения ротора на высоких оборотах (3000 и 1500 оборотов в минуту для 2 и 4 полюсных турбогенераторов соответственно). При этом центробежные силы оказывают изгибающие нагрузки на лобовые части обмотки ротора.
- **высокие температуры** – из-за протекания огромных токов приводящий к нагреву элементов ротора, в первую очередь его активной части – обмотки, неравномерное тепловое расширение меди и стали, ускоренное старение изоляции.
- **вибрация** – связана как с вращением ротора имеющего огромную массу на больших оборотах, так и с электромагнитной составляющей. Также величина вибрации может быть связана с небалансом массы ротора.
- **электромагнитные нагрузки** – возникают при эксплуатации генератора, во время переходных процессов, режимов короткого замыкания и так далее.

Перечисленные факторы характерны для работы всех крупных электрических машин, и для большинства из них являются неустраняемыми либо имеют узкий диапазон для минимизации. Все относятся к разряду электромеханических нагрузок и оказывают негативное влияние на общее состояние генераторного оборудования. Кроме них существуют другие причины выхода из строя электрических машин:

- **заводские дефекты** – связаны с ошибками, недоработками, отклонениями, нарушениями при проектировании и производстве оборудования на заводах-изготовителях.
- **эксплуатационные дефекты** – связаны с работой машины в ненадлежащих условиях, за пределами режимов, при повышенной нагрузке, и при низкой культуре эксплуатации. Повышенный износ оборудования, его моральное и физическое старение.
- **ремонтные дефекты** – появляются при отклонении от технологии ремонта, не своевременном ремонте, отсутствии ремонтных работ и их низкой культуре.

Указанные ремонтные, эксплуатационные и заводские дефекты при должном подходе являются устраняемыми.

Статистический анализ

В виду того, что основная часть материалов, в первую очередь те, что касаются стоимости проводимых работ, относится к коммерческой тайне, в данной статье были использованы сведения из источников находящихся в открытом доступе.

Проведен анализ нарушений в работе турбогенераторов [1] за период 2001-2005 гг.

В данный период произошло 74 технологических нарушения в работе роторов.

Нарушения в работе роторов возникали чаще всего из-за несоблюдения регламента технического обслуживания турбогенераторов.

Причинами нарушений в работе роторов являлись дефекты 7 сборочных единиц. В таблице 1 и на диаграмме (рисунок 1) представлено распределение дефектов по сборочным единицам.

Таблица 1 – Сборочные единицы с дефектами

Наименование сборочной единицы		%
Катушки обмоток		33.8
Контактные кольца		27
Токопроводы		25.7
Бандажные кольца	5.4	
Остальное	8.1	

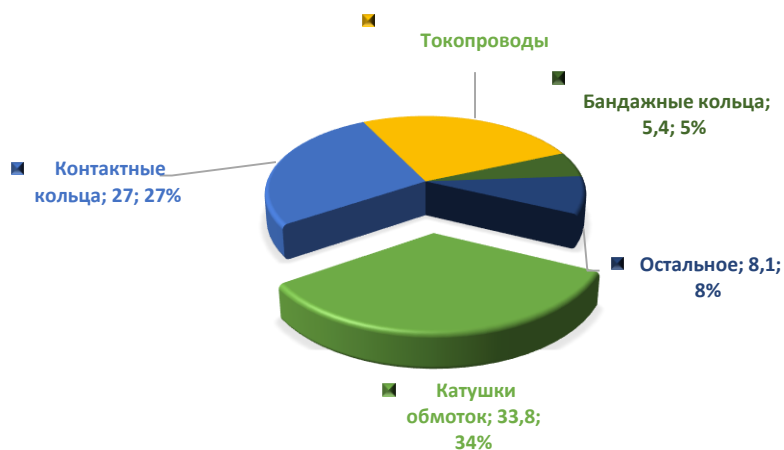


Рис. 1. Сборочные единицы с дефектами

Повреждение катушек обмотки занимает значительную часть (33,8 %) от всех нарушений в работе ротора.

Основными причинами дефектов в обмотках:

- Увлажнение витковой изоляции;
- Загрязнение корпусной изоляции;
- Усталостные трещины на витках катушек;
- Нарушение паяк
- Эрозийный износ медных втулок водоподвода системы охлаждения обмотки.[1]

Наиболее типичные последствия нарушений приведены на Рис.2

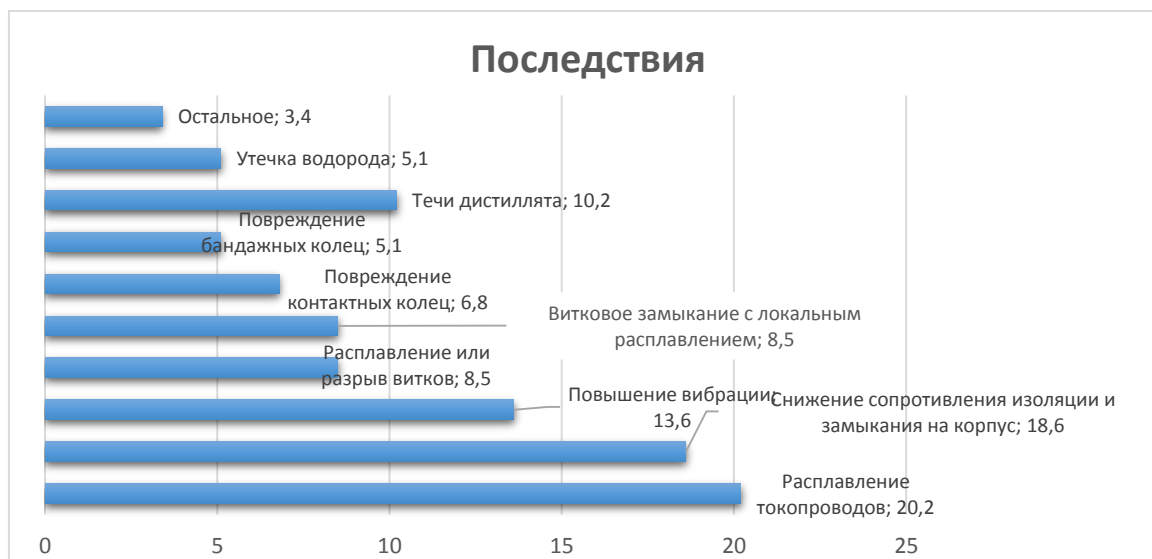


Рис. 2. Наиболее типичные последствия нарушений в роторе

На основании статистического анализа можно сделать вывод о том, что неполадки в роторе турбогенератора могут привести к тяжелейшим последствиям.

Уровни развития дефекта, его устранение и ориентировочная стоимость работ.

Повреждения сгруппированы следующим образом:

- Первый уровень. Отклонения от нормальной работы устраняемые без снятия бандажных колец.

- Второй уровень. Отклонения от нормальной работы устраняемые которых необходимо снять бандажные кольца и восстановить изоляцию.

- Третий уровень. Нарушение магнитного натяжения привело к усталости металла и появлению микротрещин в шейке вала. Ротор подлежит замене.

Первый уровень.

К первому уровню отнесены неисправности, которые устранимы без снятия бандажных колец. В таблицах 2, 3, 4 будет рассмотрен план мероприятий необходимый для устранения межвиткового замыкания первой стадии [2,4,5,6].

В данном случае будет рассмотрен турбогенератор ТВВ-800-2.

Таблица 2 – Перечень работ при разборке турбогенератора

№	Наименование операции	цена, руб	Трудоем-ть, чел/часов	Кол-во, чел
1	Выполнение технических мероприятий, но обеспечению условий электробезопасности (отсоединение шинопроводов, кабелей, наложение заземлений)	-----	выполняет персонал	-----
2	Вытеснение водорода, выполнение соответствующих мер безопасности (убедиться в отсутствии взрывоопасной смеси внутри генератора; создать видимые разрывы на трубопроводах, подводящих водород, воздух и инертный газ, сняв съемный элемент и установив заглушки) и проверка газоплотности генера-	8044	22	3

	тора			
3	Разборка щеточного аппарата	8371	3.5	2
4	Проточка (шлифовка) контактных колец	8610	15.5	2
5	Разборка трубопроводов масла, технической воды, дистиллята	24134	1.5	3
6	Разборка муфт соединения роторов турбины, генератора и возбудителя: отсоединение болтовых креплений возбудителя к фундаменту		3	5
7	Строповка возбудителя и транспортировка его на ремонтную площадку		3	4
8	Разборка масляных уплотнений		2	2
9	Разборка диффузоров		1.5	2
10	Снятие щитов генератора		22	5
11	Вывод ротора	30342	45	5
12	Выемка газоохладителей (воздухоохладителей) генератора	11107	22	4

Стоит отметить, что перечни работ, приведенные в таблицах 2, 3 будут одинаково справедливы и для случаев, когда у турбогенераторов будет вторая и третья стадии повреждений.

Таблица 3 – Перечень работ при сборке турбогенератора

№	Наименование операции	цена, руб	трудоемкость, чел/часов	Количество, чел
1	Ввод ротора	30342	45	5
2	Центровка роторов турбины и генератора		5	4
3	Установка щитов	8512	17	5
4	Сборка диффузоров	24134	1.5	2
5	Сборка масляных уплотнений вала		2	2
6	Подсоединение маслопроводов		13	9
7	Установка газоохладителей (воздухоохладителей) генератора		13	3
8	Проверка газоплотности генератора		22	3
9	Установка щеточного аппарата: установка и подгонка траверсы, установка и подгонка щеткодержателей и щеток, подсоединение кабелей и шинопроводов, установка ограждения	8044	12	2
10	Установка возбудителя: строповка возбудителя, транспортировка его с ремонтной площадки к генератору и установка на фундаменте	8371	18.5	4
11	Центровка роторов возбудителя и генератора	7718	19	5
12	Подсоединение кабелей и шинопроводов	8512	10	3

№	Наименование операции	цена, руб	трудоемкость, чел/часов	Количество, чел
13	Испытания предпусковые, на холостом ходу и под нагрузкой (снятие характеристик XX, КЗ, сопротивлений, в асинхр. режиме)	5781	6	2

В таблице 4 представлен перечень работ, необходимый для непосредственного устранения виткового замыкания на первой стадии развития дефекта, дополнительные расходы, а также расчет финансовых потерь связанных с простоем машины.

Таблица 4 – Перечень работ и необходимые средства для устранения виткового замыкания на первой стадии развития дефекта

Наименование операции	цена, руб	трудоемкость, чел/часов	Кол-во, чел
Ремонт ротора с проверкой плотности заклиновки пазов, посадки и состояния бандажных и центрирующих колец (без снятия), контактных колец, вентиляторов, токоподводов, крепления балансировочных грузов, проверкой газоплотности, продуваемости и гидравлической плотности	56477	72.5	3
Восстановление изоляции обмотки ротора методом промывки дисциллятом	67461	412.2	7
Изготовление деревянной опалубки и комплекта деталей временной расклиповки лобовых частей обмотки ротора	35930	10	4

Итоговое количество финансовых средств необходимых для устранения виткового:

$$p = \sum p_i = 351890 \text{ руб}$$

С учетом дополнительных расходов Р будет принято равным 400 тыс. руб.

Далее будет рассчитано общее количество времени затраченное на ремонт турбогенератора:

$$t = \sum t_i = 771,7 \text{ часов}$$

Учитывая дополнительные затраты времени $t=850$ часов.

Расчет средств потеранных при простое машины:

- Мощность генератора $P=800$ МВт (ТБВ-800)

- Тариф на электроэнергию (май 2015 г.) $k=3,09$ руб/(КВт*ч)[7]

$$p' = P \cdot 10^3 \cdot t \cdot k = 800 \cdot 10^3 \cdot 850 \cdot 3,09 = 2101,2 \text{ млн. руб}$$

Суммарные затраты составили:

$$\sum p' = p' + p = 2101,2 \cdot 10^6 + 400000 = 2101,6 \text{ млн. руб}$$

Второй уровень.

Ремонт на втором уровне развития дефекта является более трудоемким, по сравнению ремонт на ранних стадиях развития виткового замыкания, т.к. в данном случае необходим съем бандажных колец и увеличение объема ремонтных операций.

Данные по сборке и разборке турбогенератора приведены в таблицах 2 и 3. Разборка и сборка являются общими при ремонте турбогенераторов на разных

стадиях развития дефекта.[2,4,5,6].

Таблица 5 – Перечень работ и необходимые затраты для устранения виткового замыкания на второй стадии развития дефекта

Наименование операции	цена, руб	трудоемкость, чел/часов	Кол-во, чел
Разборка ротора	70553	90	6
Изготовление деревянной опалубки и комплекта деталей временной расклиповки лобовых частей обмотки ротора	35930	10	4
Изготовление комплекта деталей расклиновки лобовых частей	63868	9	3
Замена катушки обмотки (при снятых бандажных кольцах) с расклиновкой, распайкой, удалением деталей расклиновки, выемкой, заменой гильз, чисткой пазов, укладкой новой катушки, опрессовкой, пайкой, заклиновкой	56477	48	7
Устранение виткового замыкания в лобовой части обмотки ротора при снятом бандажном кольце	20908	24	3
Переклиновка паза при снятых бандажных кольцах	6044	10	2
Подготовка нового комплекта изоляционных деталей (клинья, подклиновые прокладки, детали расклиновки лобовых частей, детали узлов токоподвода) и установка их на ротор	51670	8	3
Изготовление комплекта изоляционных деталей узла токоподвода ротора (коробки, крышки, колодки, прокладки, шайбы, заглушки)	16425	7	3
Восстановление изоляции обмотки ротора методом промывки дисциллятом	67461	412.2	5

Трудоемкость работ рассчитана для случая, при котором замкнуты два витка.

Итоговое количество финансовых средств необходимых для устранения виткового:

$$p = \sum p_i = 581358 \text{ руб}$$

С учетом дополнительных расходов Р будет принято равным 650 тыс. руб.

Далее будет рассчитано общее количество времени затраченное на ремонт турбогенератора:

$$t = \sum t_i = 871,7 \text{ часов}$$

Учитывая дополнительные затраты времени $t=950$ часов.

Расчет средств потерянных при простое машины:

- Мощность генератора $P=800$ МВт (ТБВ-800)

- Тариф на электроэнергию (май 2015 г.) $k=3,09$ руб/(КВт*ч)[7]

$$p^* = P \cdot 10^3 \cdot t \cdot k = 800 \cdot 10^3 \cdot 950 \cdot 3,09 = 2348,4 \text{ млн. руб}$$

Суммарные затраты составили:

$$\sum p^* = p^* + p = 2348,4 \cdot 10^6 + 650000 = 2349,05 \text{ млн. руб}$$

Третий уровень

При достижении третьей стадии, ротору генератора необходим ремонт в условиях завода-изготовителя. Так как дальнейшая эксплуатация генератора с витковым замыканием, может привести к механическим повреждениям ротора. Данные мероприятия помимо ремонтных работ потребуют вывода ротора, его транспортировки, длительному простоем генератора и как следствие к колоссальным затратам. Суммарный размер всех перечисленных затрат соизмерим со стоимостью нового ротора.

Стоимость ротора с учетом транспортировки будет принято равной 1,2 млрд. руб., а время необходимое для его изготовления 7 месяцев, причем 3 из них необходимы для проведения тендеров и организации производства, 1 месяц для доставки ротора заказчику. Итого 11 месяцев.

Расчет средств потерянных при простое машины:

- Мощность генератора $P=800$ МВт (ТБВ-800)

- Тариф на электроэнергию (май 2015 г.) $k=3,09$ руб/(кВт*ч)[7]

$$p = P \cdot 10^3 \cdot t \cdot k = 800 \cdot 10^3 \cdot 7920 \cdot 3,09 = 19,58 \text{ млрд. руб}$$

Суммарные затраты составили:

$$\sum p = p + p = 19,58 + 1,2 = 21,78 \text{ млрд. руб}$$

Данные исследования показали, насколько важны системы диагностики, так как от этого зависят не только экономические убытки, но жизни людей. Из всего вышесказанного следует сделать вывод, что раннее обнаружение виткового замыкания в обмотке ротора позволяет избежать аварийный остановов энергоблоков и вызванных этим последствий. Одним из наиболее оптимальных решений является установка систем диагностики витковых замыканий.

Список использованной литературы.

1. Турбогенераторы: Аварии и инциденты. Техническое пособие / Самородов Ю.Н. М.: ЭЛЕКС-КМ, 2008. – 488 с.
2. Поддержание живучести турбогенераторов/ Ростик Г.В. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2012. – 112 с. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик» Вып.7 (163)].
3. Самородов Ю.Н. Причины и последствия аварий и отказов турбогенераторов [Электронный ресурс] // Электросервис-НТЦГ – URL: <http://www.elektro-nt.ru/investigation-of-the-causes-of-accidents/accidents-faults-of-turbogenerators/15-causes-consequences-of-accidents-and-failures-of-turbine-generators.html> (дата обращения: 10.10.2015).
4. РД 34.45.614. Руководство по капитальному ремонту турбогенераторов [Электронный ресурс] // Снипов.нет. – URL: http://www.snipov.net/database/c-294966472_doc_4294844699.html (дата обращения: 10.10.2015).
5. РД 34.45.605 Временные указания по технологии перемотки обмоток роторов турбогенераторов [Электронный ресурс] // Открытая база ГОСТов. – URL: http://standartgost.ru/g/РД_34.45.605 (дата обращения: 10.10.2015).
6. ОАО «ЦКБ Энергоремонт». Базовые цены на работы по ремонту электрооборудования/ ОАО «ЦКБ Энергоремонт», 2007
7. Тарифы на электроэнергию в томской области 2015 [Электронный ресурс] // Энерго-консультант – URL: <http://www.energo-consult->

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ

Т.В. Рябова, А.В. Жаворонок

Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: Creamka@sibmail.com, lark@tpu.ru

Научный руководитель: Жаворонок А.В., ассистент

Данная статья посвящена обзору экономических проблем и перспектив развития тепловой энергетики в России. Проведенное исследование показало - техническое оборудование тепловых станций морально устарело, что ведет к снижению технико-экономических показателей. Перспективы развития этой отрасли требуют хорошо скоординированных научно-технических усилий. Проблемы теплоэнергетики в стране, как никогда актуальны.

В настоящее время теплоэнергетика занимает одну из ведущих позиций в энергетике нашей страны. Она присутствует в таких отраслях, как сельское хозяйство, промышленность, бытовая промышленность. Тепловая энергетика является одной из самых материалоемких отраслей в мире.

Тепловые электрические станции (ТЭС) – относят к основному виду электрических станций в России. Функция ТЭС заключается в том, что она производит электрическую энергию благодаря преобразованию химической энергии органического топлива в механическую энергию вращения вала электрогенератора. Ареал теплоэлектростанции зависит от расположения потребителей и мест добычи топлива. Теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) располагают рядом или непосредственно в самих крупных городах, это все потому, что дальность передачи горячей воды не должна превышать 15–20 км (затем вода остывает).

По статистике 70% от всего объема, произведенной электроэнергии на электрических станциях, приходится на тепловую энергетику.

Такой высокий процент участия теплоэнергетических станций в выработке электрической энергии на территории России обусловлен историческими и экономическими факторами, влияющими на отрасль в процессе ее развития.

Теплоэлектростанции (ТЭС), расположенные на территории России, можно классифицировать по признакам приведенным ниже:

- вид используемой энергии – органическое топливо, энергия от геотермальных источников, энергия солнца;
- вид отпускаемой энергии – КЭС (конденсационные), (ТЭС) теплофикационные;
- процент использования установленной электрической мощности и доли участия ТЭС в покрытии годового графика электрической нагрузки – базовые (не менее 5000 ч в год на установленной мощности), полупиковые (3000 ч в год), пиковые (менее 1500–2000 ч в год).

В то же время, ТЭС, использующие органическое топливо, могут классифицироваться используя технологический признак: